

せん断応力と引張応力が作用する 鋼材の延性破壊実験

篠原 一輝¹・賈 良玖²・加藤 弘務³・葛 漢彬⁴

¹学生会員 名城大学 理工学部建設システム工学科

(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail: 110425157@ccalumni.meijo-u.ac.jp

²名城大学ポスドク研究員 自然災害リスク軽減研究センター

(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

³学生会員 名城大学大学院 理工学研究科建設システム工学専攻

(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

⁴フェロー 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科

(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail: gehanbin@meijo-u.ac.jp

大地震で被災した鋼構造物では、すみ肉溶接や部分溶け込み溶接による接合部における破断がよく見られている。そこでは引張応力のみならずせん断応力も作用する場合がある。しかし、引張応力とせん断応力を受ける部材の延性破壊のメカニズムの解明は進んでいないのが現状である。本研究では、せん断応力が鋼材の延性き裂の発生、進展にどのような影響を及ぼすかについて実験的に調べようとしている。また、異なる鋼材の破壊までの塑性吸収エネルギーによる比較を行い、定量的な関係が見られるか検討することも目的の一つである。

Key Words : ductile fracture, shear stress, tensile stress, monotonic loading, absorbed plastic energy

1. 緒言

1995年の兵庫県南部地震では、多くの鋼構造物に脆性的な破壊が生じた。中でも神戸ハーバーウェイP75橋脚の隅角部においては、鋼橋において初めて脆性的な破壊モードが確認された¹⁾³⁾。特に、溶接部近傍で塑性変形後の破壊が見られた⁴⁾。塑性変形過程での脆性的な破壊は、多軸応力とひずみ集中を受ける接合部などにおいて、まず延性き裂が発生し、そこに応力が集中し延性き裂が進展して、ある限界サイズに達したとき生じるということが知られている。したがって、地震時の脆性的な破壊を防止するためには、大きな塑性ひずみを受けた後でも十分な破壊靱性を有する鋼材を適用することが必要であると考えられる。

一方、柱部材は主に圧縮および曲げを受けるのに対し、梁腹板や隅角部、図-1に示すように部分溶け込み溶接断面ではせん断力が卓越し、図-2に示すような破壊モードが見られる⁵⁾⁶⁾。これまでの鋼構造分野における研究では、垂直応力（引張応力）が支配する状況での破壊実験は数

多く行われているが、せん断応力も作用する状況での破壊実験は進んでいないのが現状である。そこで本研究では、せん断応力が支配する状況での鋼材の破壊実験を行い、破壊までの過程や崩壊の状況を実験的に明らかにする。そのために、単調載荷試験を行い、破壊までの状況や破断面の角度などの崩壊の状態などについて比較検討

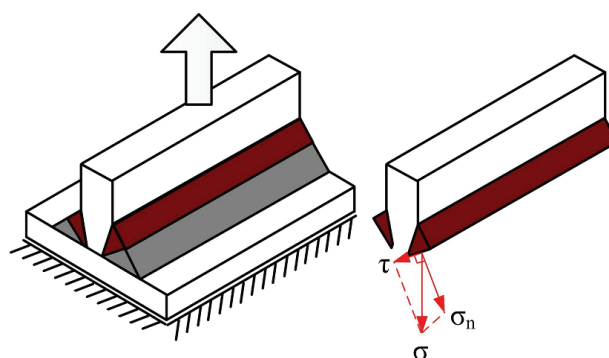


図-1 部分溶け込み溶接断面の応力状態

を行う。そして、実験から得られた荷重－変位曲線を用いてエネルギー吸収量を算出する。また、SS400, SM490A, SM570の三種類の鋼材を用いて実験を行うため、鋼種の違いによる影響を明らかにし、それぞれの材料特性についても併せて検討を行う。

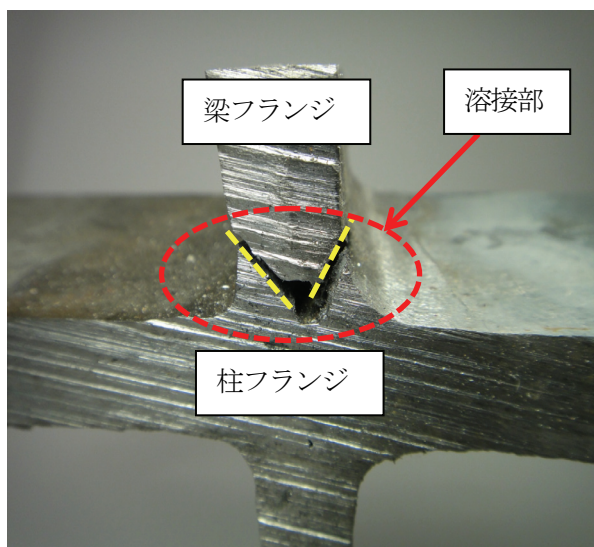


図-2 部分溶け込み溶接断面の破壊モード

2. 実験概要

ここで、試験片について説明する。三種類の鋼種にそれぞれ初期状態で純せん断が作用する場合（Pure Shearシリーズ，以降PSシリーズと称する），軸力とせん断力が作用する場合（Shear and Tension シリーズ，以降STシリーズと称する）の二種類を用いての単調引張試験（Monotonic Tensile Test）を行う。試験片の概要図，実測寸法，化学成分及び機械的性質をそれぞれ図-3，表-1，2，3に示す。表-3に示す機械的性質は実験直前に行った材料試験の結果である。

試験片の設計は，破壊する箇所を特定するためにPSシリーズ，STシリーズ共に $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 25 \text{ mm}$ の半径（設計値）で切り出し，他の部分より細くすることで断面積を小さくした。この部分（以降，塑性変形部と称する）が単調引張試験を行った際に塑性化すると想定している。また，PSシリーズは引張軸方向と垂直な方向に対し塑性変形部が 0° になるように設定し，STシリーズでは引張軸方向と垂直な方向に対し塑性変形部が 30° の角度になるように設定した。前述したように，PSシリーズは引張軸方向と垂直な方向に対し塑性変形部が 0° になるように設定してあるので，初期状態において塑性変形

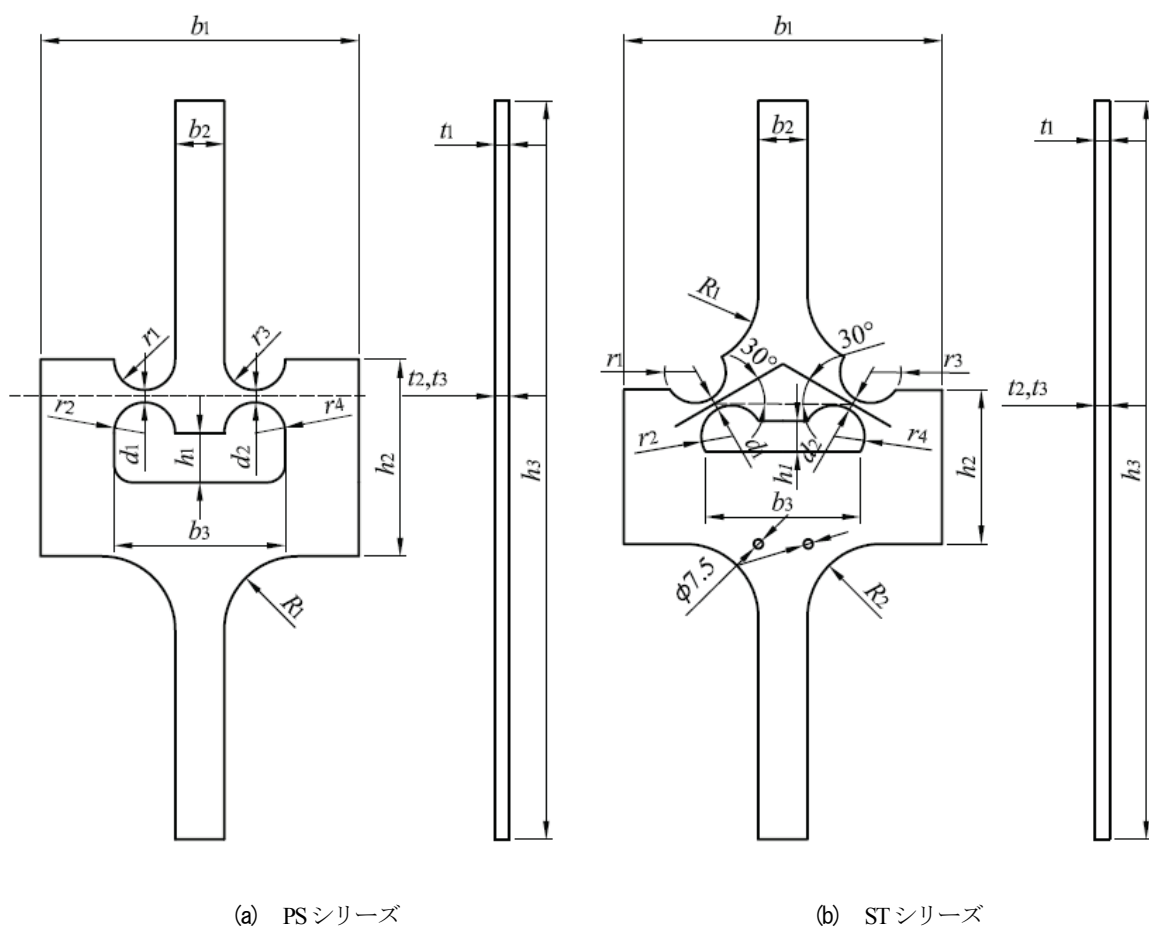


図-3 試験片の概要図

表-1 実測寸法 (mm)

試験片名	b_1	b_2	b_3	h_1	h_2	h_3	R_1	R_2	d_1	d_2	r_1	r_2	r_3	r_4	t_1	t_2	t_3
PS-SS400-M	40	260	140	40	160	600	60		10.3	10.3	25.1	25.3	25.2	24.9	11.6	11.6	11.6
PS-SM490-M	40	260	140	39	161	600	60		10.3	10.3	25.3	24.7	25.0	24.7	11.6	11.6	11.6
PS-SM570-M	40	260	140	39	160	600	61		10.2	10.2	24.8	24.7	25.0	24.7	12.0	12.0	12.0
ST-SS400-M	40	260	134	30	125	600	60	60	10.2	10.2	25.3	25.3	25.7	25.6	11.5	11.5	11.5
ST-SM490-M	40	260	132	30	125	600	60	60	10.2	10.2	24.7	24.4	25.1	25.2	11.6	11.6	11.6
ST-SM570-M	40	260	133	30	125	600	59	60	10.2	10.2	25.3	25.1	25.8	25.4	12.0	12.0	12.0

表-2 化学成分 (%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	V
SS400	0.12	0.23	0.57	0.016	0.015					
SM490A	0.1	0.25	1.41	0.016	0.004				0.012	0.001
SM570	0.1	0.18	1.54	0.01	0.002	0.01	0.02	0.01	0.02	0.06

表-3 機械的性質

鋼種	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
SS400	283	416	32
SM490A	351	530	24
SM570	543	643	15

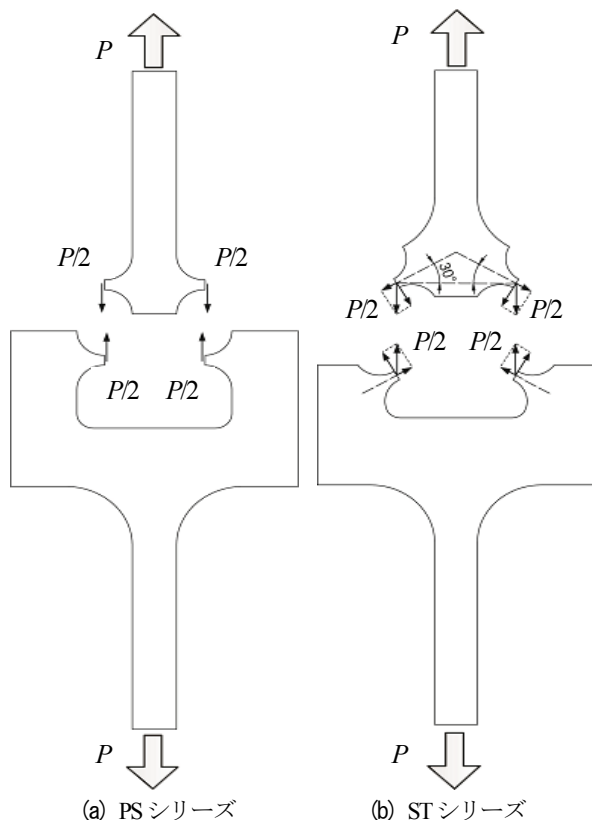


図-4 試験片に作用する断面力

部の断面に対し、せん断力のみが作用し、STシリーズでは塑性変形部に引張軸方向と垂直な方向に対し30°の角度を与えることで、塑性変形部の断面に対しせん断力と軸力が作用すると考案した設計である。両端に外力P

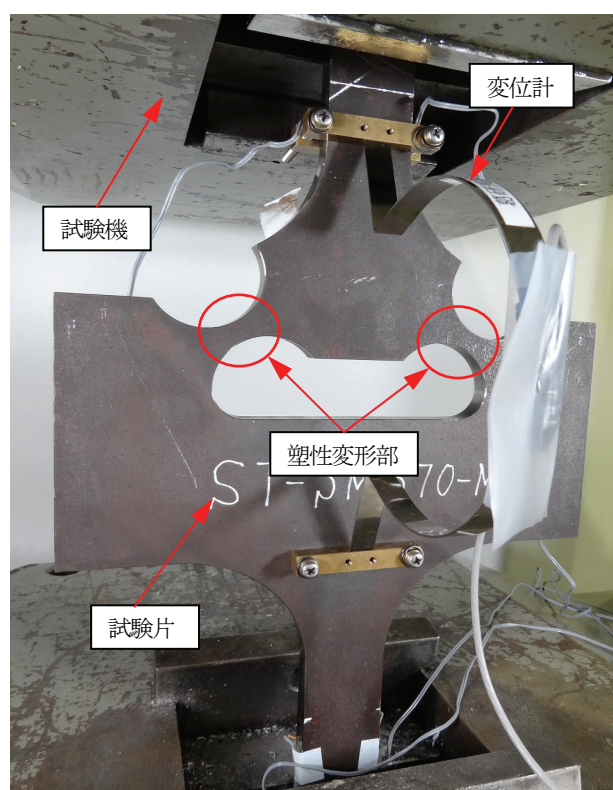


図-5 試験片を設置した状態

を載荷した場合に塑性変形部に作用する断面力を図-4に示す。STシリーズには変位計を取り付けるための穴(φ7.5 mm)をあけている。試験には、島津万能試験機(以降、試験機とする)を用いる。試験片を設置した状態を図-5に示す。試験片の偏心をできるだけ少なくするためひずみゲージを板厚方向に4枚貼り、4枚のゲージの誤差が10%以内になるように調整しながら試験片を設置した。試験機の制御は手動で行い、ひずみゲージ、変位計、試験機の出力の値はデータロガーを通じてパソコンでモニターした。変位計は標点間距離200 mmのパイ型

のものを用いた。三台のビデオカメラを用いて実験中の試験片の様子を正面と塑性変形部の上下から撮影する。载荷は試験片が破断するまで行い、载荷速度は準静的であり、温度は室温で行った。

図-6, 7に材料試験片の概要と公称応力-公称ひずみ

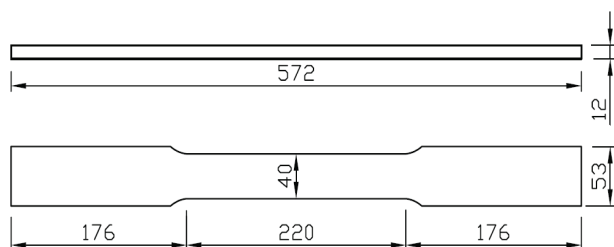


図-6 材料試験の試験片の概要図

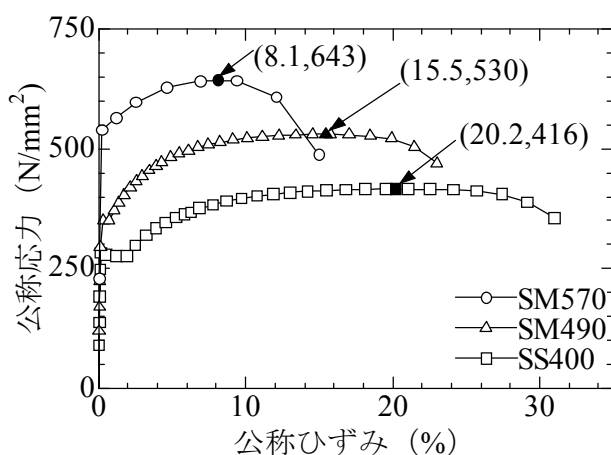


図-7 材料試験の公称応力-公称ひずみ曲線

3. 実験結果

(1) 破壊モード

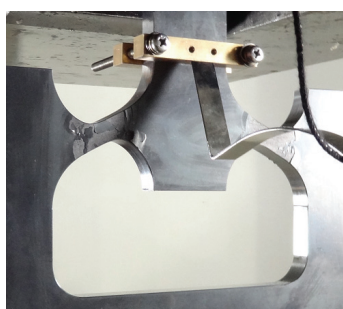
以下に破壊概況と破断面の比較、及びネッキング後の伸びについて記す。

(a) 破壊概況

PSシリーズとSTシリーズの破壊過程を写真-1, 2に示す。写真-1, 2の(b), (c)に示すように、塑性変形を受ける過程では概ね左右対称の変形が見られた。その後ネッキングが片側の塑性変形部の中央で発生し、この部分に変形が集中し、一気に破断した。試験片の設計は左右対称であったが、最終的な破壊モードは左右対称ではなかった。これは実測寸法が僅かながら左右対称でなかったことと、载荷軸の僅かな偏心が原因と考えられる。このようにネッキング発生までの塑性変形中では概ね左右対称であったため、ネッキング発生は僅かな対称性の違いなどが敏感に影響すると考えられる。また、PSシリーズでは写真-1の(c)に示すように、塑性変形を受ける過程で塑性変形部が载荷軸の角度に次第に近づいていき、塑性変形部の断面は次第にせん断応力より引張応力が支配する状況になった。



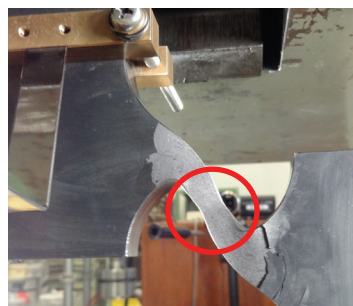
(a) 载荷直前



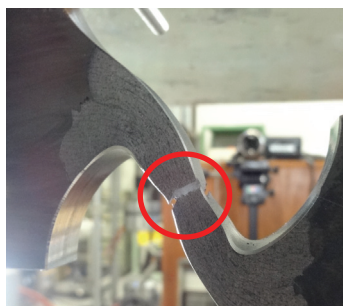
(b) 塑性変形開始



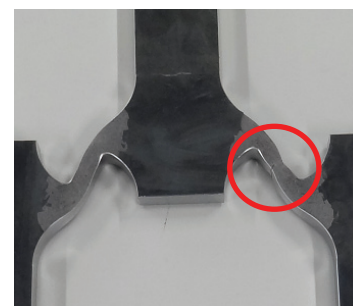
(c) 塑性変形中



(d) ネッキング発生



(e) 破断



(f) 試験終了

写真-1 PSシリーズの破壊過程



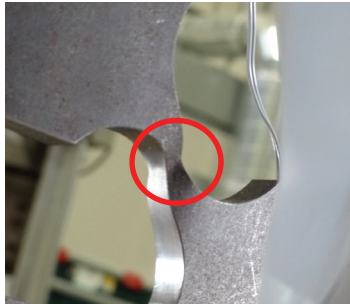
(a) 荷重直前



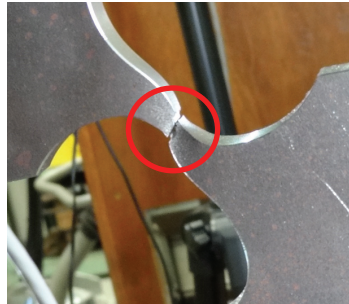
(b) 塑性変形開始



(c) 塑性変形中



(d) ネッキング発生



(e) 破断



(f) 試験終了

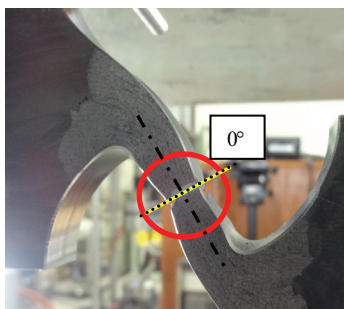
写真-2 STシリーズの破壊過程

表-4 破断面の角度の比較

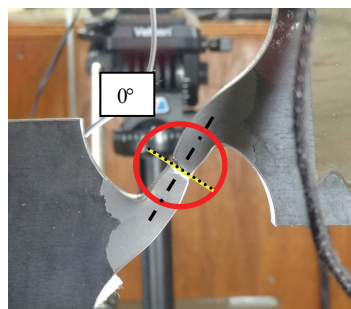
試験片名	破断面の角度
PS-SS400-M	0°
PS-SM490-M	0°
PS-SM570-M	0°
ST-SS400-M	30°
ST-SM490-M	31°
ST-SM570-M	28°

(b) 破断面の角度の比較

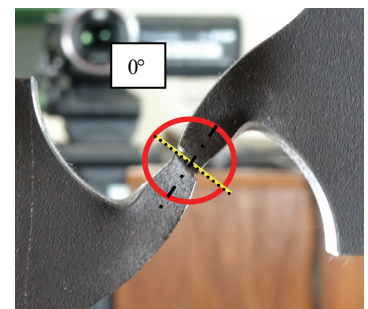
試験終了後に計測した破断面の角度について表-4に、模式的な図を写真-3に示す。破断時の断面を塑性変形部の長さ方向に垂直な断面に対し得られた角度について比較すると、PSシリーズでは0°、STシリーズでは概ね30°であった。写真-4の(a)に示すように、一軸の引張試験を行うと長さ方向に垂直な断面に対して得られる角度は0°である。これにより、PSシリーズでは破断直前にお



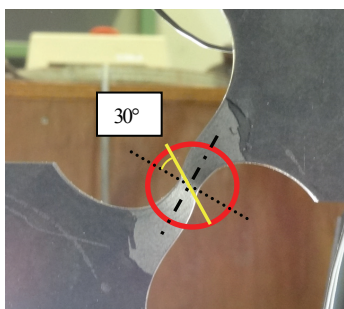
(a) PS-SS400-M



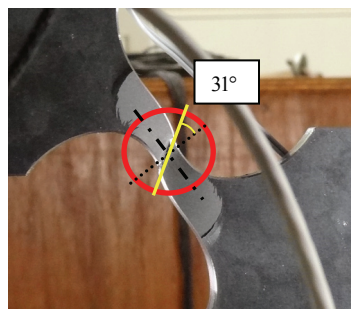
(b) PS-SM490-M



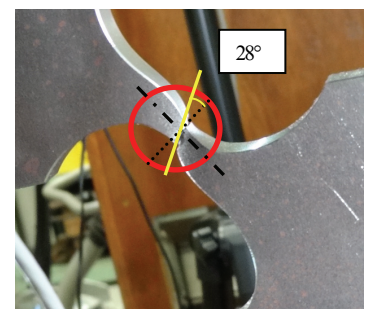
(c) PS-SM570-M



(d) ST-SS400-M

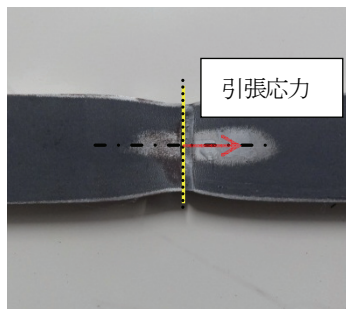


(e) ST-SM490-M

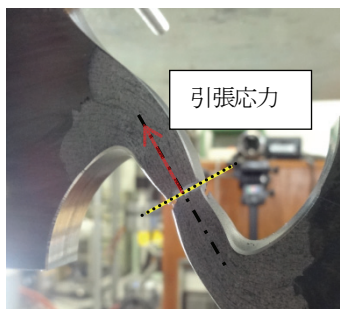


(f) ST-SM570-M

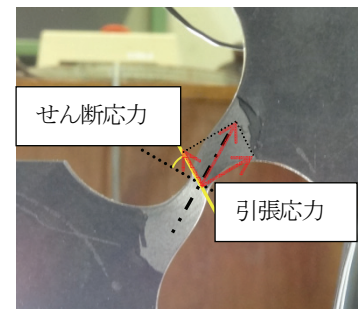
写真-3 破断面の角度の比較



(a) 材料試験



(b) PSシリーズ



(c) STシリーズ

写真-4 破断面の角度による応力の解析

表-5 ネッキング後の伸び量とその割合

鋼種	PSシリーズ		STシリーズ	
	Δ_n (mm)	α (%)	Δ_n (mm)	α (%)
SS400	3.26	11.1	1.63	12.8
SM490A	3.18	12.5	2.11	19.4
SM570	3.26	13.7	3.37	31.0

Note: Δ_n = ネッキング発生から破断までの伸びの量, α = Δ_n / δ_r , δ_r = 破断までの全体の変位

る塑性変形部の破断面の角度が一軸の引張試験と同じであるため引張応力が支配していると考えられる。また、STシリーズでは概ね30°の角度が得られたため引張応力とせん断応力が同時に作用しているということが考えられる。またこの角度は試験片設計時の塑性変形部に、引張軸方向と垂直な方向に与えた角度と概ね一致する。今回の試験片では、この角度についての違いは2パターンしかないため、破断面に与える影響は今後も検討の余地がある。

(c) ネッキング後の伸び

表-5にネッキング後の伸びの量 Δ_n とその割合 α について示す。今回の試験片では、破断までの全体の伸び δ_r に対するネッキング後の伸びの割合 α が最も大きかった鋼種はSM570であり、その中でもSTシリーズが31%を占め最も大きかった。反対に最も小さかった鋼種はSS400であり、その中でもPSシリーズが11%と最も小さかった。このため、今回使用した鋼種の中で、ネッキング後の延性はSM570が良いと評価できる。反対に、ネッキング前の伸びの割合はSS400が最も大きかった。

(2) 荷重－変位曲線

試験より得られた荷重－変位曲線を図-8に示す。図-8を用いて降伏荷重 P_y 、降伏変位 δ_y 、最大荷重 P_u 、最大荷重時の変位 δ_u 、破断時の荷重 P_r 、破断時の変位 δ_r を決定した。降伏棚がほとんど見られなかったため、図-9に示す手法⁷⁾を用いて降伏荷重 P_y 及び降伏変位 δ_y を決定した。

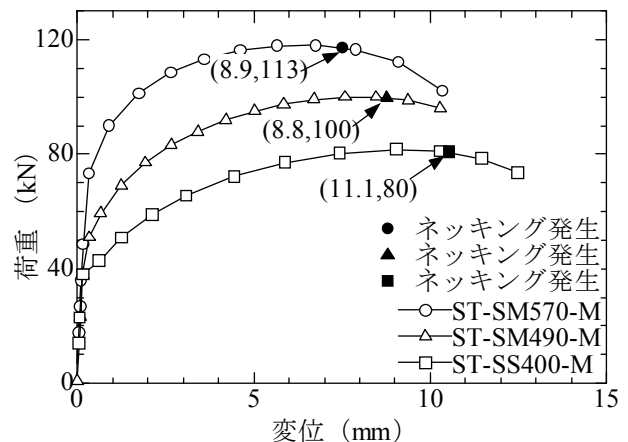
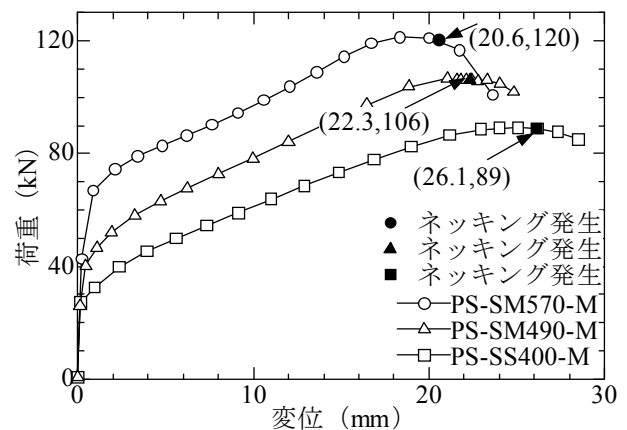


図-8 荷重－変位曲線

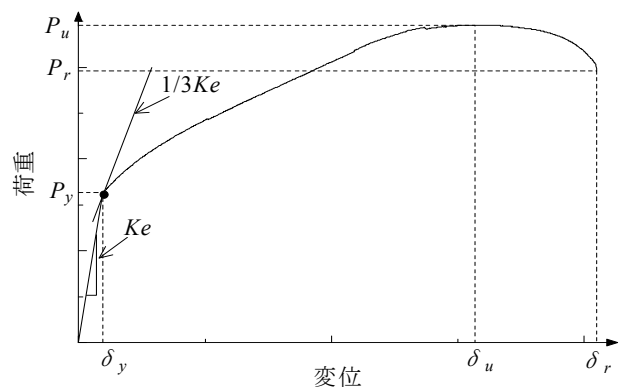


図-9 降伏荷重と降伏変位の決定方法

表-6 荷重－変位曲線より得られたデータ

鋼種	PS シリーズ						ST シリーズ					
	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	P_r (kN)	δ_r (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	P_r (kN)	δ_r (mm)
SS400	29.0	0.16	89.2	24.6	79.1	29.4	36.8	0.13	81.8	9.00	71.5	12.7
SM490A	35.8	0.20	107	20.6	95.9	25.5	44.5	0.19	100	8.04	90.8	10.9
SM570	60.9	0.43	121	18.9	97.1	23.9	70.9	0.29	118	6.45	93.1	10.9

Note: P_y = 降伏荷重, δ_y = 降伏変位, P_u = 最大荷重, δ_u = 最大荷重時の変位, P_r = 破断時の荷重, δ_r = 破断時の変位

まず明らかに弾性域内と判断される荷重初期段階の剛性 K_e をデータより算出し, その1/3を接線剛性として持つ点の荷重を P_y , その点の変位を δ_y と決定した. 最大荷重 P_u は実験のプロットデータより最も大きい荷重を採用し, その時の変位を δ_u とした. 破断時の荷重 P_r は荷重が一気に低下した点の直前の荷重を採用し, その時の変位を δ_r とした. これによって得られた値を表-6に示す.

表-6に示すように今回使用した全ての鋼種において, P_y の値はSTシリーズの方が大きい, P_u の値はPSシリーズの方が大きいということがわかる. また, 両方のシリーズにおいて強度があがるほど P_u の値は大きく, δ_u は小さな値が得られた. さらに, δ_r の値はPSシリーズの方が大きく, その中でも最も大きかった鋼種はSS400であった. ここで, SM490とSM570の δ_u は近い値が得られた. これは, ネッキング発生までの伸びはSM490の方が大きかったが, ネッキング発生後の伸びはSM570の方が大きかった. そのため最終的な伸びは近い値が得られたと考えられる. 特にSTシリーズでは, δ_r の値はPSシリーズよりとても小さいため, 非常に近い値が得られたと考えられる.

(3) エネルギー吸収量による比較

先に示した荷重－変位曲線を用いてエネルギー吸収量を算出する. 図-10に算出方法を示す. 試験開始から荷重が最大荷重の95%に低下した点までの荷重－変位曲線を用い⁹⁾, この点から弾性除荷を仮定して得られた図形の総面積をエネルギー吸収量として算出する. その結果を表-7に示す. ここに, 両シリーズにおいて強度が高いほどエネルギー吸収量は大きくなっていることがわかる. これは破断時の変位は強度が高いほど小さくなるが, 最大荷重が大きくなっているためであると考えられる. また, PSシリーズはSTシリーズの概ね2倍のエネルギー吸収量が得られた. これはPSシリーズの方がSTシリーズより破断時の変位と最大荷重ともに大きかったためである. さらに, 破断面の角度0°のPSシリーズでは塑性変形を受ける過程でせん断応力の占める割合が次第に小さくなると考えられ, 破断時の変位と最大荷重ともに大きかったため, せん断応力の作用する割合が小さい方が大き

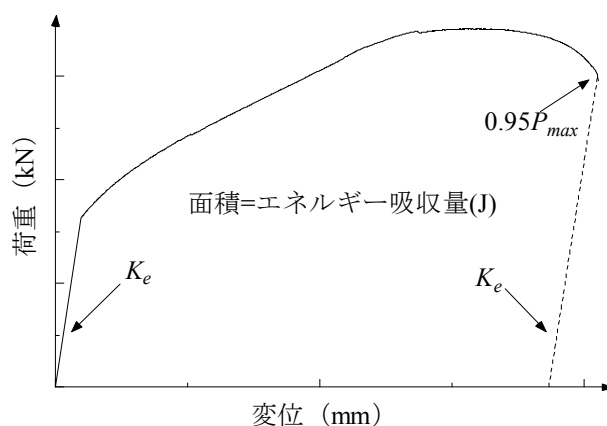


図-10 エネルギー吸収量算出方法

表-7 エネルギー吸収量

鋼種	E_{PS} (J)	E_{ST} (J)	β
SS400	2,009	893	2.2
SM490A	2,043	949	2.2
SM570	2,348	1,155	2.0

Note: E_{PS} = PSシリーズのエネルギー吸収量, E_{ST} = STシリーズのエネルギー吸収量, $\beta = E_{PS}/E_{ST}$

なエネルギー吸収量が得られると考えられる.

4. 結言および今後の研究課題

(1) 結言

本研究は, せん断応力と引張応力が作用する状況での単調荷重試験による鋼材の延性破壊実験を行い, 破壊モード, エネルギー吸収量に及ぼす応力状態や鋼種の影響などについて検討した. 得られた主な知見を以下に示す.

1. 荷重中塑性変形を受ける過程において概ね左右対称の変形をしたが, ネッキングは片側のみで発生しその部分に変形が集中し一気に破断した. 試験片の設計は左右対称であるが, ネッキング発生以降の破壊が対称ではなかったのは僅かな試験片の対称性の違いや, 荷重軸の偏心が敏感に影響したためである.
2. 試験片の破断面はPSシリーズでは0°, STシリーズで

は30°であり、試験片の塑性変形部に与えた角度と概ね一致した。この角度が破断面に与える影響について継続して検討する必要がある。

3. 破断面の角度を見ると破断直前では、純せん断を仮定したPSシリーズでは一軸引張試験の破断面と一致するため引張応力が支配し、設計時に30°の角度を与えたSTシリーズではせん断応力と引張応力が作用したと考えられる。
4. 破断面の角度が0°であったPSシリーズは、破断面の角度が30°であったSTシリーズの約2倍のエネルギー吸収量が得られた。
5. ネッキング後の伸びの割合は今回使用した鋼種の中でSM570が最も大きく、ネッキング後の延性が良いと評価できる。反対にネッキング前の伸びの割合はSS400が最も大きくネッキング前の延性が良いと評価でき、鋼材の強度が高いものほどネッキング後の延性が良く、低いものほどネッキング前の延性が良いといえる。

(2) 今後の研究課題

今回の研究では、塑性変形部に与えた角度は2パターンのみであったためパターンを増やして検討することが必要である。そして、載荷パターンの違いによる影響を検討するため繰り返し載荷での実験を行う必要がある。また、純せん断が作用すると仮定したPSシリーズが塑性変形を受ける過程で引張応力が支配してしまったため、載荷中常にせん断応力のみが作用する試験片のモデルを検討する必要がある。さらに、有限要素解析を行い試験片の応力状態を明らかにし、せん断応力と引張応力の相関関係を明らかにすることが必要である。

参考文献

- 1) 岡下勝彦, 大南亮一, 道場康二, 山本晃久, 富松実, 丹治康行, 三木千壽: 兵庫県南部地震による神戸港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.243-261, 1998.
- 2) 佐々木栄一, 荒川泰二, 三木千壽, 市川篤司: 鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止に必要な鋼材の破壊靱性レベル, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.93-102, 2003.
- 3) 羽田新輝, 速水景, 鈴木俊光, 葛漢彬: ルートギャップが存在する鋼厚肉部材の未溶着高さおよびフィレット半径の違いによる延性き裂発生・進展への影響に関する実験的研究, 土木学会中部支部平成 23 年度研究発表会, I-10, pp.19-20, 2012.
- 4) 橋田知幸, 藤平正一郎, 南二三吉, 豊田政男: 兵庫県南部地震による被害鉄骨仕口部の強度・靱性変化特性, 日本建築学会大会学術講演梗概 C-1 構造Ⅲ, pp.859-860, 1996.
- 5) 天野麻衣, 渡辺智彦, 宇佐美勉, 葛漢彬: 繰返しせん断力を受ける鋼板の強度と変形能, 土木学会, 第 3 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.57-62, 2000.
- 6) 葛漢彬, 大橋正稔, 田島僚: 鋼製厚肉断面橋脚における延性き裂の発生とその進展に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.493-502, 2007.
- 7) 島田侑子, 吉敷祥一, 山田哲: 実験結果に基づく全塑性モーメントの評価方法に関する考察, 日本建築学会関東支部研究報告集, No.2042, pp.305-306, 2008.
- 8) 原田浩之, 江頭寛, 小田稔, 小坂英之, 山中久幸: 軸ひずみを有する低降伏点鋼制震パネルのせん断加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.21265, pp.529-530, 2008.
- 9) 宇佐美勉, 織田博孝: 鋼構造物の耐震解析法および耐震照査法に関する研究展望, 土木学会論文集 No.668/I-54, pp.1-16, 2001.

DUCTILE FRACTURE OF STRUCTURAL STEEL UNDER COMBINED SHEAR AND TENSILE STRESSES

Kazuki SHINOHARA, Liang-Jiu JIA, Hiromu KATO and Hanbin GE

Fracture of fillet welds and partial penetration welds were observed in past strong earthquakes, where the location of crack initiation is subjected to combined shear and tensile stresses. However, studies on ductile fracture under the coupling stress state are limited in the field of steel structures. This study aims to experimentally investigate the effect of coupling stress on ductile crack initiation and propagation of several typical steels in bridge engineering. Two series of specimens made of three different steels are employed, where specimens are respectively under pure shear, shear and tension at the initial loading stage. The cracking processes of the specimens are studied. Meanwhile, absorbed plastic energy of the specimens is also investigated.